

El sistema de cabalgamientos imbricados de Amenthes, Marte

The Amenthes imbricate thrust system, Mars

C. Fernández¹, J. Ruiz² y V. López³

- 1 Dpto. Geodinámica y Paleontología, Universidad de Huelva, Campus de El Carmen, 21071-Huelva. fcarlos@uhu.es
- 2 Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid ruiz@mncn.csic.es
- 3 Instituto Español de Oceanografía, Servicios Centrales, Corazón de María 8, 28002 Madrid.

Resumen: La región de Amenthes se sitúa en el hemisferio oriental de Marte (≈ 100 - 120°E), en posiciones ecuatoriales. Su localización próxima al borde de la dicotomía y la presencia de abundantes escarpes lobulados de dirección NO-SE hacen de esta región un lugar muy apropiado para el análisis de su evolución tectónica durante el Noéico superior – Hespérico inferior. Para ello, se ha levantado un perfil topográfico MOLA de unos 1100 km de longitud en dirección perpendicular a la de los escarpes. La señal topográfica puede caracterizarse como una suave pendiente regional inclinada hacia el SSO sobre la que se observa un residual constituido por los escarpes. Mediante el programa de simulación mecánica Coulomb se ha podido comprobar que la pendiente regional obedece a una gran falla normal, de dimensiones litosféricas, buzante hacia el NE y con un desplazamiento de unos 2 km. Por su parte, los escarpes lobulados obedecen a un sistema de cabalgamientos imbricados buzantes hacia el NE y enraizados a unos 25 km de profundidad. El desplazamiento total de este sistema de cabalgamientos es de unos 5,5 km y su arquitectura recuerda la de los cinturones orogénicos terrestres, aunque con acortamientos del 0,5%, muy inferiores a los medidos en nuestro planeta.

Palabras clave: Cabalgamientos imbricados, Amenthes, Marte.

Abstract: The Amenthes region is located at the eastern hemisphere of Mars (≈ 100 - 120°E), near the Martian Equator. A set of NW-SE directed lobate scarps and the nearby presence of the dichotomy boundary make this region very appropriate for a study of its tectonic evolution during the Late Noachian – Early Hesperian. A MOLA profile with a length of 1100 km, normal to the trend of the scarps, has revealed a complex topography, with a regional slope slightly dipping to the SSW, and a residual relief constituted by the lobate scarps. The mechanical simulation program Coulomb has been used to analyze the profile. Results show that the regional slope is due to a lithosphere-scale normal fault, dipping to the NE and with a displacement of ca. 2 km. The rest of the topography can be explained by an imbricate thrust system rooted in a detachment level located at a depth of 25 km within the crust. This thrust system shows a total displacement of ca. 5.5 km and its architecture strongly recalls that of similar terrestrial systems, although with very smaller shortening values (0.5 %).

Key words: Thrust system, Amenthes, Mars.

INTRODUCCIÓN

La corteza de Marte se encuentra dividida en dos grandes sectores: el hemisferio sur está constituido por una corteza gruesa (≈ 60 km) y antigua, que origina las llamadas tierras altas del Sur, mientras que gran parte del hemisferio norte se caracteriza por una corteza más delgada (≈ 40 km), que da lugar a las llamadas tierras bajas del Norte, aunque su basamento es también antiguo, y recubierta por materiales relativamente modernos. Esta diferencia entre hemisferios es lo que se conoce como dicotomía marciana. El límite entre ambos dominios está marcado por una línea más o menos neta, el borde de la dicotomía, que, localmente, muestra un escarpe topográfico con desniveles de más de 2 km. Abundantes estructuras de origen tectónico surcan la superficie del planeta, especialmente en las tierras altas del Sur. Algunas de estas estructuras son enormemente llamativas, como el gigantesco cañón Valles Marineris o los campos de crestas serpenteantes de Thaumasia. La

mayor parte de la actividad tectónica del planeta tuvo lugar durante el Noéico (> 3.7 Ga) y el Hespérico (≈ 3.7 a 3.0 Ga), aunque no parece haber cesado totalmente hoy en día (Anderson *et al.*, 2001). Un periodo especialmente interesante de esta evolución tectónica se desarrolló en el límite entre ambos periodos, cuando se formaron la mayor parte de las estructuras que rodean la gran región de Tharsis, en el hemisferio occidental de Marte, que es la región más activa desde el punto de vista tectónico y volcánico del planeta.

La región de Amenthes se localiza en el hemisferio oriental de Marte, estando comprendida entre las longitudes 100°E y 120°E , ligeramente al Norte del Ecuador (Fig. 1). A pesar de no encontrarse en las cercanías de Tharsis, ha atraído la atención de numerosos investigadores (p. ej., Schultz y Watters, 2001; Watters, 2003). Esto es debido a su cercanía al borde de la dicotomía, en el que existe un acusado escalón. De acuerdo con Watters (2003), este escalón es

en parte una consecuencia de la carga de materiales depositados en las tierras bajas del Norte, al pie del borde de la dicotomía. Por otro lado, la región de Amenthes muestra excelentes ejemplos de una de las estructuras más características de la corteza marciana, los escarpes lobulados. Estas estructuras son unos relieves alargados, positivos, con un talud frontal de pendiente acusada, y una ladera de inclinación más suave por el otro lado. Se interpretan como el resultado topográfico del desplazamiento a lo largo de un cabalgamiento en profundidad, cuya traza llega hasta la superficie en la base del escarpe frontal (Watters y Robinson, 1999). La más importante de estas estructuras en Marte es Amenthes Rupes, con casi 1 km de altura, más de 70 km de anchura y varios cientos de km de longitud (Fig. 1). Amenthes Rupes ha sido exhaustivamente estudiado con objeto de establecer la inclinación del cabalgamiento que lo ha generado, la magnitud del desplazamiento producido y, especialmente, la profundidad a la que se enraíza en la corteza media (Schultz y Watters, 2001).

En este trabajo se aborda el estudio de los escarpes lobulados de la región de Amenthes, incluido Amenthes Rupes, con un enfoque distinto del utilizado hasta ahora en la región o en el estudio de cualquier otro sector de Marte. La presencia de un conjunto de escarpes paralelos en Amenthes (Fig. 1) sugiere que los cabalgamientos que los han generado han podido actuar de manera conjunta, constituyendo sistemas complejos en profundidad. Esto haría del análisis de cada cabalgamiento por separado una tarea poco representativa o incluso errónea. Por ello, se ha intentado simular la topografía de la región de Amenthes en su conjunto mediante la actividad de un sistema de cabalgamientos cuyo análisis permitirá obtener un conocimiento más detallado de la zona y una comparación más precisa con análogos terrestres.

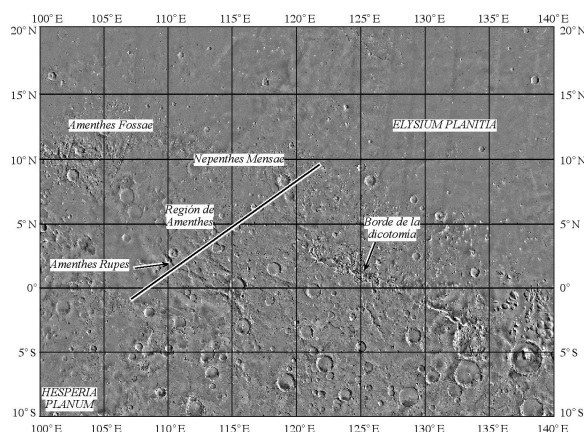


FIGURA 1. Modelo de elevación digital de la región de Amenthes (MOLA, resolución 1/32°) mostrando la localización del perfil topográfico analizado.

METODOLOGÍA

Se ha levantado un perfil topográfico en dirección SSO-NNE a través de la región de Amenthes, entre las coordenadas 107.2°E/0.6°S y 122.1°E/9.6°N, de unos 1100 km de longitud (Figs. 1 y 2). El perfil muestra los

rasgos esenciales de la topografía en la región de Amenthes: el escarpe del borde de la dicotomía al NE que da paso a las tierras bajas del Norte, una zona elevada o meseta que constituye el núcleo de Amenthes salpicada de relieves menores como varios escarpes lobulados y cráteres de impacto, y una llanura en la parte SO, situada entre 500 y 1000 m por debajo del radio medio del planeta. La meseta muestra una suave pendiente hacia el SO, indicativa de un basculamiento en dicha dirección de toda la región.

Con objeto de interpretar estructuralmente los rasgos topográficos del perfil, se ha utilizado la aproximación que proporciona el modelo mecánico Coulomb (Toda *et al.*, 2005). Se trata de un algoritmo de elementos finitos que permite determinar la deformación, campo de desplazamientos y estado de esfuerzos en el entorno de una falla o sistema de fallas de geometría prescrita. Uno de los resultados del modelo es la predicción de la expresión topográfica causada en un perfil por el desplazamiento a lo largo de la falla o fallas analizadas. La aplicación del modelo al perfil estudiado ha consistido en el análisis cualitativo del ajuste entre la topografía causada por el modelo y la observada en el perfil. Para ello se ha investigado una enorme variedad de geometrías de sistemas de fallas (alrededor de 1000) que difieren entre sí por la inclinación y desplazamiento de cada falla, la profundidad del despegue basal hacia el que convergen y en el detalle de la arquitectura del sistema de fallas en profundidad (presencia de estructuras de tipo *duplex* y de varias superficies de despegue). El resultado que se presenta aquí corresponde al modelo con mejor ajuste entre la topografía observada y la calculada. Los parámetros que se han considerado al aplicar el modelo son los siguientes. El espesor de la corteza se ha establecido en 60 km para la meseta elevada de Amenthes, y en 40 km tanto para las tierras bajas del Norte, como para la llanura del SO (Neumann *et al.*, 2004). Los parámetros elásticos considerados para la corteza son parecidos a los usados por Schultz y Watters (2001) y tienen en cuenta los resultados experimentales de basaltos y peridotitas, es decir, módulos de Young de 100 y 140 GPa para la corteza y el manto, respectivamente, una relación de Poisson de 0.25 para ambos, y un coeficiente de fricción de 0.6. Se han hecho varias pruebas modificando estos valores, especialmente el módulo de Young, y los resultados no muestran variaciones apreciables (ver también Schultz y Watters, 2001).

RESULTADOS

El primer hecho a destacar es que no es posible simular la pendiente regional de Amenthes mediante cabalgamientos corticales. Las grandes dimensiones de esta tendencia regional (casi 800 km de anchura en el perfil de la Fig. 2) sólo son explicables mediante estructuras de dimensiones litosféricas. En este sentido, una gran falla normal buzante hacia el NE, que afecta a la totalidad de la litosfera con un pequeño desplazamiento de unos 2 km, es capaz de generar la pendiente regional requerida. Otra estructura similar,

localizada en la parte NE del perfil, permitiría explicar el borde de la dicotomía. En cuanto a los relieves con menor longitud de onda (podríamos denominarlos residuales), los situados al sur de Amenthes Rupes pueden ser ajustados mediante una serie de cabalgamientos vergentes hacia el SO (dada la orientación de los escarpes en los distintos escarpes), que se enraizarían en un despegue basal situado a unos 10 km de profundidad. Amenthes Rupes puede ser ajustado con un cabalgamiento inclinado hacia el NE

unos 30° y que finaliza a unos 25 km de profundidad, lo que coincide con estimaciones anteriores para esta estructura (Schultz y Watters, 2001). Sin embargo, el cabalgamiento de Amenthes Rupes no parece acabar a dicha profundidad transfiriendo su desplazamiento a una corteza inferior dúctil, sino que se tiende y se prolonga hacia el NE mediante un despegue hacia el que converge el resto de cabalgamientos y despegues situados a ambos lados de dicho escarpe.

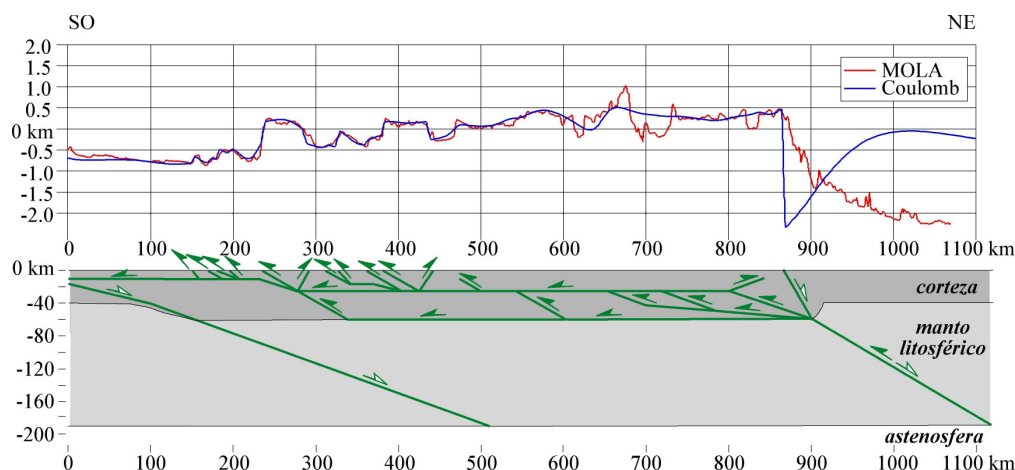


FIGURA 2. Panel superior: perfil MOLA (línea roja) de la región de Amenthes (localización en Fig. 1) mostrando los principales rasgos topográficos de la zona. La línea azul muestra la topografía simulada mediante el programa Coulomb. Panel inferior: Corte idealizado de la litosfera marciana en la región de Amenthes ilustrando las principales estructuras que explican la topografía observada. Explicación en el texto.

Por su parte, el modelo sugiere que la falla de Amenthes Rupes continúa también hasta la base de la corteza, provocando que la topografía del escarpe forme una pequeña meseta elevada en lugar de una cresta más estrecha. Es probable que este cabalgamiento se tienda y aproveche la interfase entre corteza y manto. Por otra parte, la relativamente fuerte pendiente NE de Amenthes Rupes no puede ser explicada mediante los cabalgamientos de vergencia SO, incluso probando con ángulos de buzamiento anómalamente altos. Para conseguir el ajuste es necesario considerar un retrocabalgamiento de pequeño desplazamiento (300 m). Los relieves situados al nordeste de Amenthes Rupes se ajustaron con cabalgamientos y retrocabalgamientos de desplazamientos individuales moderados, en general inferior a 500 m. Su arquitectura refleja un patrón complejo en el que los distintos cabalgamientos convergen hacia el despegue situado a unos 25 km de profundidad. La topografía de la zona más alta de la meseta de Amenthes (entre los 500 y los 860 km del perfil) es explicable mediante una serie de grandes *duplex* en profundidad, que no generan escarpes, pero sí las ondulaciones de gran radio que se observan en el perfil. Todo este conjunto de cabalgamientos se introduciría en el manto litosférico hacia el kilómetro 1100 del perfil, en donde su desplazamiento sería de unos 5500 m. Finalmente, el desajuste que se observa en el borde de la dicotomía se debe a que dicho borde no puede ser explicado únicamente mediante causas tectónicas. Aunque Smrekar *et al.* (2004) han propuesto que el borde de la dicotomía en la cercana región de Ismenius se encuentra

asociado a una falla (lo que es consistente con nuestros resultados), otros factores, como la isostasia, la carga de los materiales acumulados en las tierras bajas del Norte (Watters, 2003), o la relajación dúctil de la corteza inferior (Nimmo, 2005), deben contribuir decisivamente a la geometría de este gran escarpe.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El acortamiento total que supone este sistema de cabalgamientos es escasamente del 0.5%. Esta cifra es similar al estiramiento debido a las fallas normales. Parece claro que ni la extensión ni el acortamiento descritos pueden ser responsables de los cambios en el grosor de la corteza (es decir, de la dicotomía o de la génesis de la llanura del SO), porque los desplazamientos estimados para las fallas son mínimos en comparación con los 20 km de adelgazamiento cortical. Por otro lado, las fallas normales deben ser anteriores a los cabalgamientos, dado que la pendiente resultante de su desplazamiento no bascula los escarpes.

Se sugiere, por tanto, que los acontecimientos tectónicos en la región de Amenthes comenzarían con la formación de la dicotomía y seguirían con el desarrollo de las fallas normales y, posteriormente, de los cabalgamientos. Estas últimas estructuras se habrían generado en el límite entre el Noéico y el Hespérico (Schultz y Watters, 2001). Centrándonos ya en esta última etapa de naturaleza contractiva, el patrón que muestran las fallas inversas corresponde a un sistema de cabalgamientos imbricados y *duplex* de escala cortical.

Esta arquitectura es muy similar a la que se observa en los cinturones orogénicos terrestres. Así, el desarrollo de estructuras *duplex* corticales y el aprovechamiento de la Moho como nivel de despegue han sido descritos en el Himalaya (Mattauer, 1986). Muchos cinturones orogénicos terrestres muestran grandes *pop-ups* similares a los de Amenthes (kilómetros 280 y 420). En la Tierra es posible observar los efectos de la tectónica de “piel fina” en las zonas externas de los cinturones orogénicos, con un cabalgamiento basal somero (<10 a 20 km de profundidad) hacia el que converge un sistema de escamas imbricadas. Es decir, algo parecido a lo que se observa al SO de Amenthes Rupes con la presencia de un despegue de 10 km de profundidad. Por otra parte, el enraizamiento de los cabalgamientos en el manto litosférico bajo el borde de la dicotomía sugiere la presencia de una zona de antigua debilidad en esa zona, a partir de la cual se transmitió el desplazamiento hacia el SO, ya dentro de la corteza.

La principal diferencia entre Amenthes y los ejemplos terrestres es la magnitud del desplazamiento absorbido por estos cabalgamientos, que llega a ser hasta de dos órdenes de magnitud inferior en Marte. Una de las razones que pueden explicar este hecho es el efecto del bajo valor de la aceleración de la gravedad, que Schultz *et al.* (2006) utilizan para explicar los pequeños desplazamientos y las bajas tasas de deformación en Marte. Por otra parte, resulta remarcable la presencia de posibles despegues sub-horizontales en Amenthes. Se han encontrado esencialmente tres: la base de la corteza, y los despegues de 10 y de 25 km de profundidad. El origen de estos despegues debe buscarse en la heterogeneidad mecánica de la corteza. El despegue en la base de la corteza puede explicarse por el cambio composicional y mecánico de la transición corteza-manto y por el carácter desacoplado de ambos en la región de Amenthes. El despegue de los 25 km está indicando la presencia de dos niveles corticales distintos y puede interpretarse como la transición frágil-dúctil, o como un contacto entre rocas de comportamiento mecánico distinto. El despegue de los 10 km suele situarse en la Tierra en el límite entre las rocas sedimentarias de la corteza superior y su basamento. Por comparación, se sugiere que en esa zona del sur de Amenthes podría existir un nivel de unos 10 km de espesor de rocas bien estratificadas (volcánicas y/o sedimentarias), cuya base podría servir como nivel de despegue. La existencia de una cuenca al sur de la meseta de Amenthes, donde la corteza es más delgada, podría ser favorable a la presencia de acumulaciones volcánicas y sedimentarias en esa zona, menos resistentes que la corteza subyacente. Por último, en este trabajo se ha asumido comportamiento frágil para la corteza y el manto litosférico. Este supuesto obliga a considerar los resultados obtenidos como una primera aproximación al problema estudiado. Avances futuros deberán

considerar el posible efecto de otros comportamientos reológicos en la corteza inferior y en la base del manto litosférico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación recibida por la Junta de Andalucía (PAI-Grupo RNM-316).

REFERENCIAS

- Anderson, R.C., Dohm, J.M., Golombek, M.P., Haldemann, A.F.C., Franklin, B.J., Tanaka, K.L., Lias, J. y Peer, B. (2001): Primary centers and secondary concentrations of tectonic activity through time in the western hemisphere of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 106: 20563-20585.
- Mattauer, M. (1986): Intracontinental subduction, crust-mantle décollement and crustal-stacking wedge in the Himalayas and other collision belts. En: *Collision Tectonics* (M.P. Coward y Ries, A.C., eds.). Geological Society of London, Special Publication, 19.
- Neumann, G.A., Zuber, M.T., Wieczorek, M.A., McGovern, P.J., Lemoine, F.G. y Smith, D.E. (2004): Crustal structure of Mars from gravity and topography. *Journal of Geophysical Research*, 109, E08002, doi: 10.1029/2004JE002262.
- Nimmo, F. (2005): Tectonic consequences of Martian dichotomy modification by lower-crustal flow and erosion. *Geology*, 33: 533-536.
- Schultz, R.A. y Watters, T.R. (2001): Forward mechanical modeling of the Amenthes Rupes thrust fault on Mars. *Geophysical Research Letters*, 28: 4659-4662.
- Schultz, R.A., Okubo, C.H. y Wilkins, S.J. (2006): Displacement-length scaling relations for faults on the terrestrial planets. *Journal of Structural Geology*, 28: 2182-2193.
- Smrekar, S.E., McGill, G.E., Raymond, C.A. y Dimitiou, A.M. (2004): Geologic evolution of the Martian dichotomy in the Ismenius area of Mars and implications for plains magnetization. *Journal of Geophysical Research*, 109, E11002, doi: 10.1029/2004JE002260.
- Toda, S., Stein, R. S., Richards-Dinger, K. y Bozkurt, S. (2005): Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research*, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.
- Watters, T.R. (2003): Thrust faults along the dichotomy boundary in the eastern hemisphere of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 108: 5054, doi: 10.1029/2002JE001934.
- Watters, T.R. y Robinson, M.S. (1999): Lobate scarps and the Martian crustal dichotomy. *Journal of Geophysical Research*, 104: 18981-18990.